

**ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ КРАТКОВРЕМЕННЫХ ОТЖИГОВ  
НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ СОСТОЯНИЯ СТАБИЛЬНОЙ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ  
ПОСЛЕ ХОЛОДНОЙ ДЕФОРМАЦИИ**

С.А. Аккузин

Научный руководитель: доцент, к.ф.-м.н., И.Ю. Литовченко

Национальный исследовательский Томский государственный университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36, 634050

E-mail: [s.a.akkuzin@gmail.com](mailto:s.a.akkuzin@gmail.com)

**INFLUENCE OF HIGH-TEMPERATURE SHORT-TERM ANNEALING ON STRUCTURAL  
PHASE STATES OF A STABLE AUSTENITE STEEL AFTER COLD DEFORMATION**

S.A. Akkuzin

Scientific Supervisor: PhD. I.Yu. Litovchenko

Tomsk State University, Russia, Tomsk, Lenin str., 36, 634050

E-mail: [s.a.akkuzin@gmail.com](mailto:s.a.akkuzin@gmail.com)

**Abstract.** *The influence of high-temperature short-term annealing on the features of the microstructure and mechanical properties of stable austenitic steel after cold deformation is studied. It is shown that, under these conditions, as a result of annealing recrystallized grains up to 2  $\mu\text{m}$  in microtwining structure are formed. The yield strength of these structural states more than 2 times increases by the original value.*

**Введение.** Возможности формирования субмикро- и нанокристаллических структурных состояний с высокими прочностными и пластическими свойствами в стабильных аустенитных сталях после различных термомеханических обработок исследуются на протяжении нескольких десятилетий [1, 2]. Показано [1], что холодная прокатка 40-90 % позволяет получить структуру с микро- и нанодвойниками деформации. В работе [2] использована последовательность из низкотемпературной деформации (вблизи  $T = -196\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и теплой деформацией при  $T = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$  с целью формирования высокой плотности микро- и нанодвойников и полос локализации деформации. Указанные структурные состояния обеспечивают высокие прочностные свойства (до  $\approx 1150\text{ МПа}$ ), пластичность при этом невысокая (относительное удлинение  $\approx 6-8\text{ }\%$ ).

В [1] подробно изучено влияние высокотемпературных длительных (до 8 ч) отжигов на развитие процессов полной и частичной рекристаллизации. Отмечается, что при температурах 900 – 1000  $^{\circ}\text{C}$  наблюдается полная рекристаллизация микродвойниковой структуры, и соответственно, рост аустенитных зерен и снижение прочностных свойств. В работе [3] показана перспективность использования кратковременных циклических отжигов после термомеханических обработок, позволяющих контролировать размеры рекристаллизованных участков микроструктуры. В связи с этим, целью настоящего исследования является изучение влияния кратковременных высокотемпературных отжигов на микродвойниковую структуру и механические свойства стабильной аустенитной стали.

**Материалы и методы исследования.** В настоящей работе исследована хромоникелевая стабильная аустенитная сталь 02X17H14M3 (Fe-16.8Cr-14.1-Ni-0.59Si-2.7-Mo-1.7-Mn-0.013C, вес. %)

после деформации и кратковременных отжигов. Исходное состояние ( $\sim 100\%$  аустенита) получено закалкой  $T = 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 1 час. В этом состоянии в стали наблюдается ячеистая дислокационная субструктура; средний размер зерна аустенита  $\sim 40\text{ мкм}$ . Исходный размер образцов  $\sim 30 \times 20 \times 11\text{ мм}$ .

Термомеханическая обработка состоит из двух этапов: пластическая деформация и высокотемпературные кратковременные отжиги. Пластическую деформацию осуществляли прокаткой при  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  в несколько проходов с общей степенью деформации  $\varepsilon \approx 75\%$ . Последующие отжиги проводили при  $T = 850\text{ }^{\circ}\text{C}$  4 цикла длительностью 70 и 150 с.

Электронно-микроскопические исследования проводили на просвечивающем электронном микроскопе Philips CM-12 при ускоряющем напряжении 120 кВ. Тонкие фольги готовили методом электролитической полировки в электролите, содержащем 450 мл ортофосфорной кислоты и 50 г хромового ангидрида. Механические испытания методом активного растяжения осуществляли на универсальной вакуумной испытательной машине типа Поляни с подвижным нижним захватом при комнатной температуре в воздухе со скоростью деформации  $\dot{\varepsilon} \approx 2 \times 10^{-3}\text{ с}^{-1}$  при комнатной температуре с использованием образцов в форме двойных лопаток с размерами рабочей части  $13 \times 2 \times 1\text{ мм}$ .

**Результаты.** После прокатки при комнатной температуре до 75 % деформации формируется аустенитная структура с высокой плотностью микро- и нанодвойников деформации (рис. 1 а). Микро- и нанодвойники залегают в нескольких плоскостях двойникования. Указанное структурное состояние обеспечивает повышение прочностных свойств стали: предел текучести  $\approx 1115\text{ МПа}$ , предел прочности  $\approx 1300\text{ МПа}$  и относительное удлинение  $\approx 4,9 - 5,4\%$  (рис. 2).

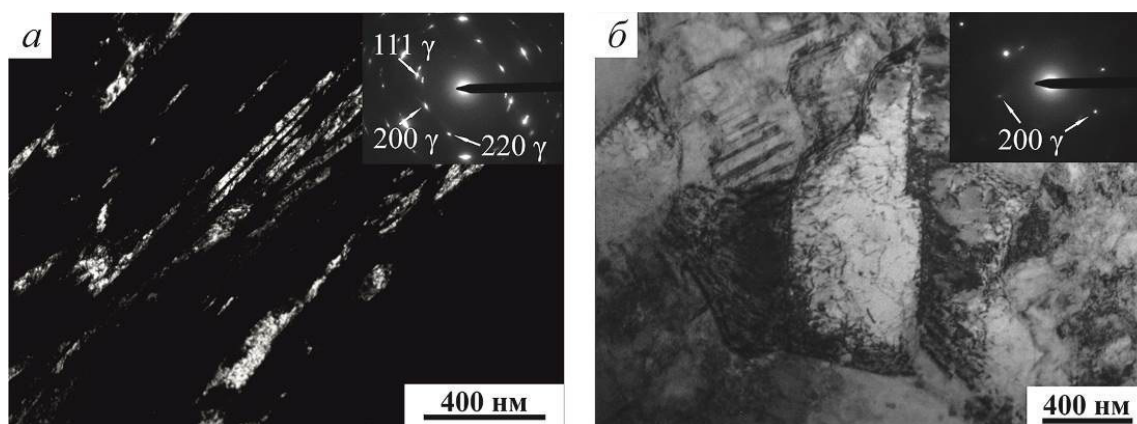


Рис. 1. Микроструктура стали 02X17H14M3 после: а) 75 % холодной деформации; б) 75 % холодной деформации + отжиг при  $T = 850\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 4 цикла, 150 с.

Отжиги (после деформации) при температуре  $T = 850\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 4 цикла, 70 с не приводят к существенным изменениям структуры – сохраняются микро- и нанодвойники деформации. Указанное структурное состояние обеспечивает высокие значения прочностных свойств: предел текучести  $\approx 1045 - 1105\text{ МПа}$ , предел прочности  $\approx 1280 - 1290\text{ МПа}$ . При этом относительное удлинение  $\approx 4,3 - 6,5\%$ .

Повышение длительности отжига до 150 с приводит к развитию процессов рекристаллизации в микродвойниковой структуре. В отдельных областях наблюдаются аустенитные зерна размером до  $\approx 2\text{ мкм}$ . Внутри таких зерен обнаружено множество дислокаций и фрагменты микродвойниковой

структуры (рис. 1. б). При этом предел текучести стали снижается до  $\approx 643 - 743$  МПа, а предел прочности – до  $\approx 868 - 944$  МПа. В результате развития в стали процессов рекристаллизации и возврата существенно увеличивается относительное удлинение до  $\approx 20,6 - 28$  % (рис. 2).

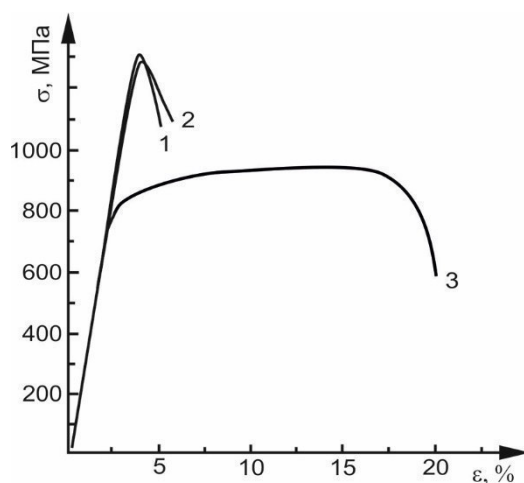


Рис. 2. Кривые  $\sigma(\epsilon)$  для аустенитной стали 02X17H14M3: 1 – после 75 % холодной деформации; 2 – после 75 % холодной деформации и отжига при  $T = 850$  °C, 4 цикла, 70 с; 3 – после 75 % холодной деформации и отжига при  $T = 850$  °C, 4 цикла, 150 с.

**Закключение.** Исследовано влияние кратковременных высокотемпературных отжигов на микро- и нанодвойниковую структуру стабильной аустенитной стали 02X17H14M3. В результате отжигов при температуре  $T = 850$  °C, 4 цикла длительностью 150 с в микродвойниковой структуре были сформированы частично рекристаллизованные области с размерами зерен аустенита до  $\approx 2$  мкм. Эти особенности микроструктуры, сочетающие микродвойниковую структуру и рекристаллизованные аустенитные зерна, обеспечивают значения пределов текучести и прочности стали более чем в 2 раза выше по сравнению с таковыми для исходного состояния.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Donadille C., Valle R., Dervin P., Penelle R. Development of texture and microstructure during cold-rolling and annealing of f.c.c. alloys: example of an austenitic stainless steel // Acta metal. – 1989. – V. 37. – № 6. – P. 1547–1571.
- 2 Akkuzin S.A., Litovchenko I.Yu., Tyumentsev A.N. Strengthening of Stable Cr-Ni Austenitic Stainless Steel under Thermomechanical Treatments // AIP Conference Proceedings. – 2017. – Vol. 1909. – PP. 020001-1–020001-4.
- 3 Ravi Kumar B., Das S.K., Sharma Sailaja, Sahu J.K. Effect of thermal cycles on heavily cold deformed AISI 304L austenitic stainless steel // Materials Science and Engineering A. – 2010. – V. 527. – P. 875–882.